

에너지 저장장치를 갖는 고 전력밀도 및 저가격형 태양광 인버터 시스템

琴文煥*, 張斗熙**, 洪成洙***, 韓翔圭****, 司空石鎭†

High Power Density and Low Cost Photovoltaic Power Conditioning System with Energy Storage System

Moon-Hwan Keum, Du-Hee Jang, Sung-Soo Hong, Sang-Kyoo Han, and Suk-Chin Sakong

요 약

본 논문에서는 고 전력밀도 및 저가형으로 구성 가능한 새로운 구조의 계통 연계형 태양광 인버터 시스템을 제안한다. 제안 시스템은 태양전지의 최대 전력점 추종기능과 배터리의 충·방전 기능을 단일 전력단으로 구성함으로써, 고 전력밀도 및 저가격형 시스템 구성이 가능하다. 또한, 제안 시스템은 배터리를 링크 캐패시터에 직렬 연결함으로써 링크 캐패시터의 전압 스트레스를 배터리 전압만큼 저감할 수 있으므로 가격저감 효과가 크다. 최종적으로 제안 시스템의 우수성과 신뢰성 검증을 위하여 1.5kW급 태양광 인버터 시스템의 시작품을 제작하였고, 이를 이용한 실험결과를 바탕으로 제안 시스템의 타당성을 검증한다.

ABSTRACT

A new high power density and low cost Photovoltaic Power Conditioning System (PV PCS) with energy storage system is proposed. Its high power density and cost effectiveness can be achieved through the unification of the maximum power point tracker and battery charger/discharger. Despite of the reduced power stage, the proposed system can achieve the same performances of maximum power point tracking and battery charging/discharging as the conventional system. Moreover, the high voltage stress across the link-capacitor can be relieved through the series-connected link-capacitor with the battery. Therefore, a large number of series/parallel-connected link-capacitors can be reduced by 4-times. Especially, when the utility power failure happens, both photovoltaic and battery energies can be supplied to the load with only one power stage. Therefore, it features a simpler structure, less mass, lower cost, and fewer devices. Finally, to confirm the operation, validity, and features of the proposed system, theoretical analysis and experimental results from a single phase AC 220Vrms/1.5kW prototype are presented.

Key Words : Photovoltaic, power conditioning system, Energy storage system, New renewable Energy

†교신저자 : 정회원, 국민대 전자공학부 교수

E-mail : djhan@kookmin.ac.kr

*정회원, 국민대 전자공학부 박사과정

**정회원, 국민대 전자공학부 박사과정

***정회원, 국민대 전자공학부 교수

****정회원, 국민대 전자공학부 부교수

접수일자 : 2011. 9. 19

1차 심사 : 2011. 10. 17

심사완료 : 2011. 11. 2

1. 서 론

전자 기술의 비약적 발전과 사용자의 문화수준 향상에 따라 전기 에너지의 수요가 기하급수적으로 증가하고 있으며 이를 위해 사용되는 에너지의 대부분이 화력발전이나 원자력 발전 등에 의존되고 있다. 그러나

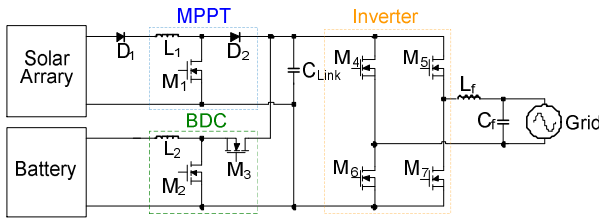


그림 1 기존 태양광 인버터 시스템
Fig. 1 Conventional PV PCS

화력발전의 주된 에너지원인 화석 연료는 환경오염의 주요원인이 될 뿐만 아니라 매장량이 점차 고갈되고 있고 그 분포가 지역적으로 편중되어 있어 에너지의 공급이 불안정하고 가격변동이 심하여 국가 에너지 수급에 큰 장애가 되고 있다. 특히, 원자력 발전의 경우 핵폐기물에 의한 지구 오염과 안전성이 큰 사회적 문제로 등장하고 있다. 이에 따라 정부는 기존 화석에너지를 대체할 수 있으며 국내 환경에 적합한 태양광 발전 보급을 활성화하기 위해 “Solar land 2010 program”을 발표한 바 있으며, 신 재생에너지 발전 전략에 대한 기준 가격제도 도입과 에너지 사업자의 자발적 협약 (Renewable energy Portfolio Agreement, RPA)체결 등을 통해 국내 발전사업자의 지원정책을 강화하고 있다. 뿐만 아니라 전력 계통의 운영 주체로써 한전에서 배전설비 이용규정의 정비 및 분산형 전원의 배전계통 연계 기술 기준의 제정 등 보급 활성화 사업에 적극적으로 지원하고 있다.

한편, 다양한 분산전원이 계통에 연계된 경우 일사량의 급격한 변동에 따른 발전량 변동으로 계통에 심각한 악영향을 미칠 수 있으며, 계통 정전 시에 부하에서 요구하는 에너지보다 발전량이 적을 경우 부하에너지를 모두 공급할 수 없으므로 최근 배터리를 적용한 태양광 발전에 관한 연구가 시도되고 있다^{[1]-[3]}. 그림 1은 현재까지 가장 많이 사용되고 있는 배터리를 이용한 에너지 저장장치를 갖는 PV PCS(Photovoltaic Power Conditioning System)를 보이고 있으며, 그림에서 보인 바와 같이 전체시스템은 MPPT(Maximum Power Point Tracking)부, BDC(Bi Directional Converter)부, 인버터부의 3단으로 구성되어 있다^{[4]-[6]}. 배터리를 가지는 PV PCS는 일사량에 관계없이 계통에 항상 일정한 전력을 공급할 수 있어 계통의 신뢰성을 향상시킬 수 있으며, 계통의 정전 시에도 부하의 에너지를 지속적으로 공급할 수 있으므로 전원 신뢰성을 향상시킬 수 있는 우수한 장점을 갖는다. 그러나 3단 구성으로 인하여 시스템 가격이 높고 소자수가 많으며 부피가 매우 커지는 단점이 있으며, 태양전지의

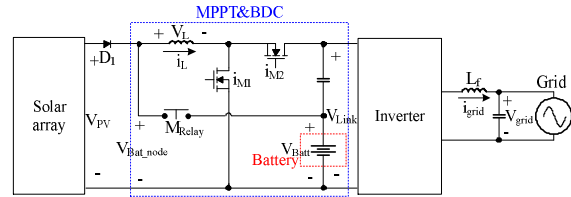


그림 2 제안된 태양광 인버터
Fig. 2 Proposed PV PCS

높은 개방 전압으로 인하여 링크 캐패시터를 직·병렬로 구성하여야 하므로 캐패시터 수 증가 및 시스템 크기가 매우 커지는 문제점을 갖는다.

따라서, 최근에는 이러한 문제점을 해결하기 위하여 링크 캐패시터 대신에 배터리를 사용하는 2단 구조의 배터리 링크형 PV PCS가 제안된 바 있다^{[7]-[9]}. 기존의 배터리 링크형 PV PCS는 링크 캐패시터 대신에 배터리를 사용하므로 링크 캐패시터 및 BDC부가 필요치 않고, 저 가격 및 고 전력밀도의 PV PCS 구성이 가능하다. 그러나 높은 링크 전압을 충전하기 위해서는 다수의 배터리를 직렬로 구성하여야 하므로 배터리 셀간의 전압 불균형 방지를 위한 BMS의 부담이 커지는 단점을 갖는다.

본 논문에서는 이러한 문제점들을 해결할 수 있는 새로운 구조의 PV PCS를 제안한다. 제안 시스템은 에너지 저장장치를 가지므로 계통 및 전원 신뢰성을 높일 수 있고 기존의 MPPT부와 BDC부를 통합하여 시스템 가격과 부피를 대폭 개선할 수 있다. 또한, 배터리와 링크 캐패시터의 직렬 연결로 링크 캐패시터의 내압을 크게 저감할 수 있으므로 저가격 및 고 전력밀도 구성이 가능하다.

2. 제안 태양광 인버터 시스템

본 논문에서는 MPPT부와 BDC부를 통합하여 동작하는 새로운 구조의 PV PCS를 제안한다. 제안된 태양광 인버터 시스템은 그림 2과 같이 MPPT부와 BDC부를 통합하여 시스템의 소자 수를 대폭 저감 할 수 있고, 배터리를 링크 캐패시터에 직렬 연결함으로써 링크 캐패시터의 전압 스트레스를 낮출 수 있다.

그림 3은 일사량 변화에 따른 제안 시스템의 동작을 나타낸 것이다. 제안 시스템의 동작은 크게 3가지 모드로 태양 전지로부터 발생된 전력을 계통으로 공급하는 전력전달모드, 방전된 배터리를 계통으로부터 전력을 공급 받아 배터리를 충전하는 충전모드, 정전 시 부하에서 필요로 하는 전력을 배터리로부터 공급하는 방전 모드로 구성된다.

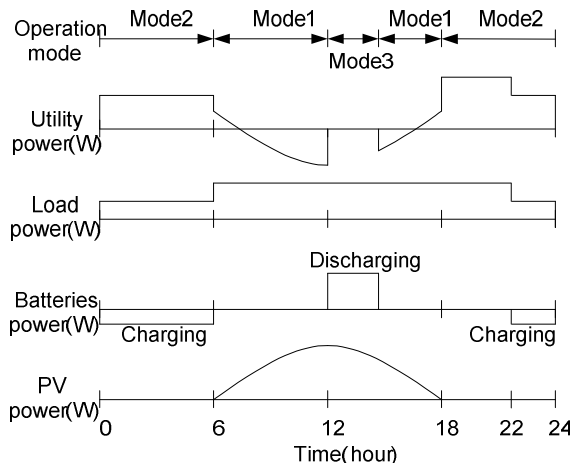


그림 3 일사량 변화에 따른 제안 시스템 동작 모드
Fig. 3 Operation mode of proposed system according to insolation

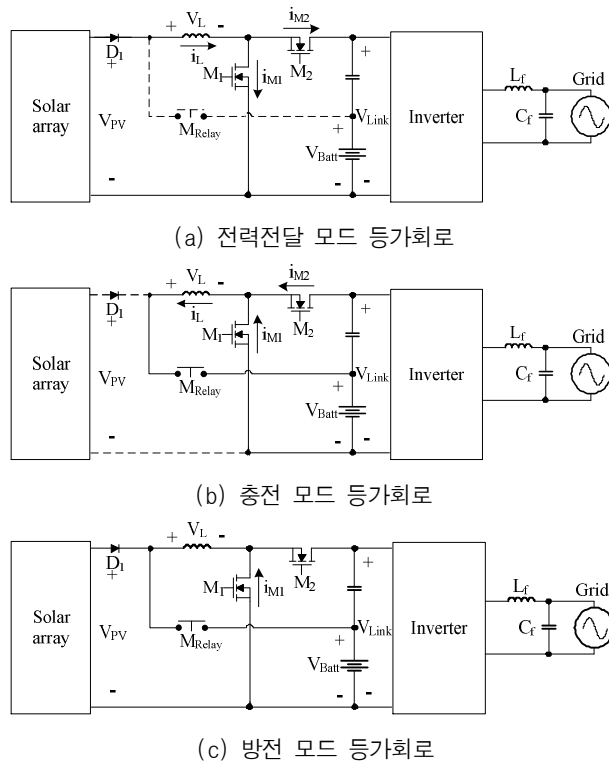


그림 4 제안 시스템 모드별 등가회로
Fig. 4 Equivalent circuit in each mode of proposed system

2.1 전력전달 모드

제안 시스템의 전력전달모드는 그림 4의 (a)와 같이 M_{Relay} 가 항상 ‘오프’되고, 태양전지에서 발생된 전력을 계통으로 전달한다. M_1 스위치가 ‘온’이고 M_2 스위치가

‘오프’인 경우에는 인덕터 양단 전압은 입력 전압인 V_{PV} 전압이 인가되고, 인덕터 전류가 증가하게 된다. M_1 스위치가 ‘오프’이고 M_2 스위치가 ‘온’인 경우에는 V_{PV} 전압과 M_2 스위치가 ‘온’ 구간 동안 생성된 전류와 함께 링크 캐패시터로 전력을 전달하게 된다. 제안 시스템의 전력전달모드는 동기형 부스트 컨버터로 동작하며 최대 전력점 추종제어를 수행한다. MPPT부를 제어하는 최대 전력점 추종 제어기법은 기존과 동일한 P&O 기법을 사용 하였다.

2.2 충전 모드

제안 시스템의 충전 모드는 그림 4의 (b)와 같이 M_{Relay} 가 항상 ‘온’되고, 배터리에 필요한 전력을 계통으로부터 공급받아 충전하게 된다. 이 모드의 동작은 M_1 스위치와 M_2 스위치가 반대로 동작하는 동기형 벡 컨버터와 동일하다. M_1 스위치가 ‘오프’이고 M_2 스위치가 ‘온’인 경우에는 인덕터와 계통으로부터 공급된 전류로 배터리에 충전하게 된다. M_1 스위치가 ‘온’이고 M_2 스위치가 ‘오프’인 경우에 계통으로부터 전력은 전달되지 않고 인덕터에 저장된 에너지를 배터리에 충전하게 된다. 충전모드는 밤에 이루어지기 때문에 태양전지에서 에너지가 넘어가지 않는다.

2.3 방전 모드

제안 시스템의 방전모드는 정전 발생 시 그림 4 (c)와 같이 M_{Relay} 를 ‘온’함으로써 부하에서 요구되는 에너지를 야간일 경우 배터리에 그리고 주간일 경우에는 PV와 배터리가 동시에 공급하게 된다. PV와 배터리의 병렬 접속을 통하여 전력을 전달하고, MPPT & BDC 부는 배터리 방전 알고리즘에 따라 동기형 부스트 컨버터로 동작한다. 방전 모드는 태양 전지의 최대 전력 점 및 배터리 전압과 정전 발생시 PV 동작점에서 발전량 및 부하의 전력 소모량에 따라 다음과 같이 4가지 세부 모드로 나눌 수 있다.

2.3.1 $V_{PV} > V_{Batt}$ & $P_{PV} > P_{Load}$

정전 발생 이전의 최대 전력 추종 전압이 배터리 전압보다 크고 PV 발전량이 부하의 전력 소모량보다 큰 경우로 그림 5 (a)와 같이 태양전지의 PV동작 점이 배터리 전압과 같은 점으로 이동하여 전력 전달이 이루어진다. 또한 태양전지의 발전량이 부하의 전력 소모량보다 크므로 전력 전달은 그림 6 (a)와 같이 부하에 필요한 소모량만을 부하로 공급하고 잔여 전력을 배터리에 충전하게 된다.

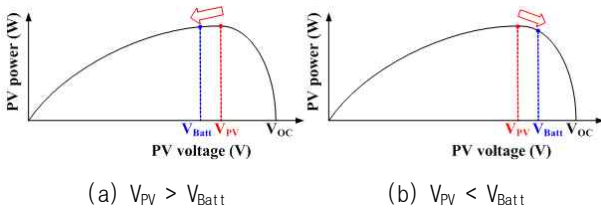


그림 5 배터리 전압에 따른 PV곡선 변화
Fig. 5 Operating point according to battery voltage

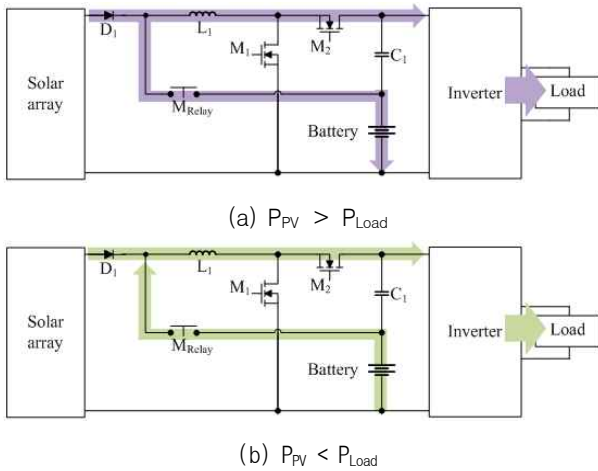


그림 6 PV 발전량 및 부하 소모 전력에 따른 전력이동
Fig. 6 Power flow in accordance with PV and load powers

2.3.2 $V_{PV} > V_{Batt} \ \& \ P_{PV} < P_{Load}$

정전 발생 이전의 최대 전력 추종 전압이 배터리 전압보다 크고 PV 발전량이 부하의 전력 소모량보다 작은 경우로 그림 5 (a)와 같이 태양전지의 PV동작 점이 배터리 전압과 같은 점으로 이동하여 전력 전달이 이루어진다. 또한 태양전지의 발전량이 부하의 전력 소모량보다 작으므로 전력 전달은 그림 6 (b)와 같이 태양전지의 발전량 모두를 부하에 전력공급을 하고 배터리는 부족한 전력량만을 부하로 공급하게 된다.

2.3.3 $V_{PV} < V_{Batt} \ \& \ P_{PV} > P_{Load}$

정전 발생 이전의 최대 전력 추종 전압이 배터리 전압보다 작고 PV 발전량이 부하의 전력 소모량보다 큰 경우로 그림 5 (b)와 같이 태양전지의 PV 동작점이 배터리 전압과 같은 점으로 이동하여 전력 전달이 이루어진다. 또한 태양전지의 발전량이 부하의 전력 소모량보다 크므로 전력 전달은 그림 6 (a)와 같이 부하에 필요한 소모량만을 부하로 공급하고 잔여 전력을 배터리로 충전하게 된다.

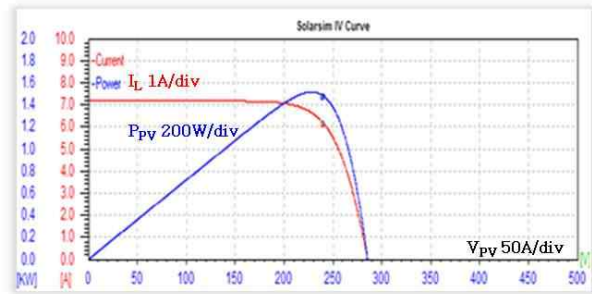
2.3.4 $V_{PV} < V_{Batt} \ \& \ P_{PV} < P_{Load}$

정전 발생 이전의 전력전달모드에서 최대 전력 추종 전압이 배터리 전압보다 작고 PV 발전량이 부하의 전력 소모량보다 작은 경우로 그림 5 (b)와 같이 태양전지의 PV 동작 이 배터리 전압과 같은 점으로 이동하여 전력 전달이 이루어진다. 또한 태양전지의 발전량이 부하의 전력 소모량보다 작으므로 전력 전달은 그림 6 (b)와 같이 태양전지의 발전량 모두를 부하에 전력공급을 하고 배터리는 부족한 전력량만을 부하로 공급하게 된다.

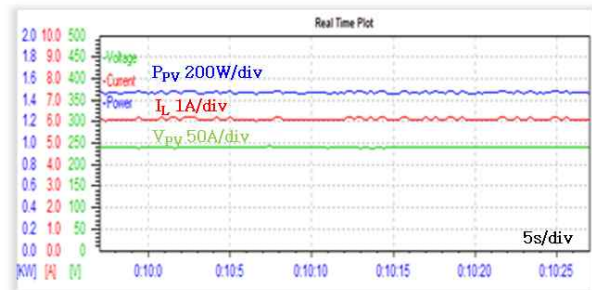
3. 실험결과

제안 시스템의 타당성 및 우수성 검증을 위해 1.5kW급 태양광 발전 시스템 시작품을 제작하였고, 실험은 전력전달 모드, 충전 모드, 방전 모드 3가지 조건으로 나누어 진행 하였다. 실험을 위해 제어는 TMS 320F28335 DSP를 사용하였고, 스위치는 FDA28N50, 인덕터는 600uH, 출력 캐패시터는 1.36mF, 배터리는 New Max사의 PNB12340을 사용하였다.

전력전달 모드의 실험을 위하여 PV Simulator를 이용하여 1.5kW($V_{oc} = 290V, I_{sc} = 7.2A$) 태양 전지 모델을

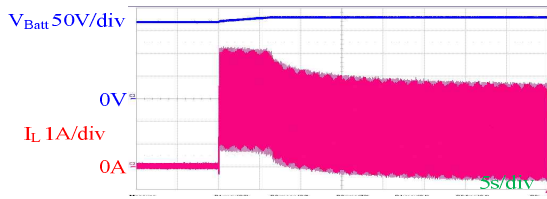


(a) P-V 및 V-I 곡선

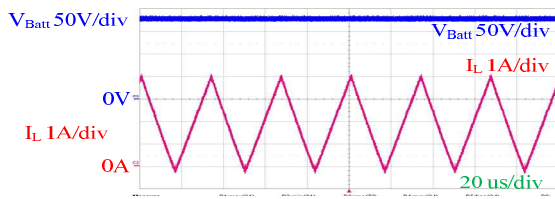


(b) 전력, 전류, 전압 곡선

그림 7 MPPT부 전력전달 모드 실험 파형
Fig. 7 Experimental waveforms at power transfer mode in MPPT



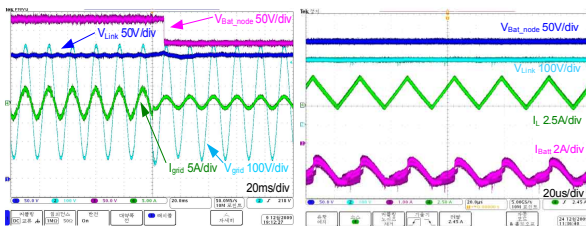
(a) 정전압 정전류 모드전환



(b) 정 전압 충전 정상상태

그림 8 BDC부 충전 모드 실험 파형

Fig. 8 Experimental waveforms at charge mode in BDC



(a) 정전 검출 모드 전환 (b) 정전 시 BDC부 정상상태

그림 9 방전 모드 실험파형

Fig. 9 Experimental waveforms at discharge mode

구성하였다. 그림 7 (a)는 제안 시스템 전력전달 모드의 실험결과로 파형은 X축의 태양전지의 전압에 따른 Y축의 태양전지 전류와 전력을 V-I 곡선 및 P-V 곡선으로 나타낸 것이다. 그림 7 (b)의 파형은 최대전력점을 추종하였을 때 실시간으로 태양전지의 전력, 전류, 전압을 나타낸 파형이다. 실험결과의 전압은 239.3V, 전류 6.2A로 1483.7kW로 약 99%의 MPPT 변환 효율을 갖는다. 또한 최대 전력점에서 P&O 기법에 의하여 일정하게 유지됨을 확인할 수 있다.

충전 모드 검증을 위하여 정 전류충전 및 정 전압충전 실험을 진행하였고, 그림 8은 실험파형으로 V_{Batt} 은 배터리 전압, I_L 은 MPPT&BDC부의 인덕터의 전류를 나타낸다. 그림 8 (a)는 배터리 정 전류 및 정 전압충전 모드전환 파형으로 초기 배터리 전압은 약 167V로 충전 되어 있고, 평균 전류 2.5A로 정 전류 충전을 하

고, 배터리가 180V 도달 이후 정 전압충전 모드로 전환되어 충전이 이루어지는 것을 확인할 수 있다. 그림 8 (b)는 정 전압충전 모드의 정상 상태 동작 파형으로 180V로 일정하게 제어 됨을 알 수 있다.

방전 모드 검증을 위하여 BDC부와 인버터부를 연계하여 실험을 진행하였다. 그림 9 (a)는 방전 모드의 동작으로 정전이전과 정전시의 모드 전환을 나타낸 파형이다. 파형은 위에서부터 태양전지 입력 노드 전압, 계통 연계점 전압, 계통 연계점 전류, 링크 전압이다. 정전이전에는 태양전지의 발전 전력인 약 650W의 전력을 계통으로 공급하고 있는 것을 확인할 수 있으며, 정전 발생으로 인하여 태양전지 입력 노드 전압이 배터리 전압으로 클램핑 된 것을 확인할 수 있다. 또한 계통이 끊어져 있으므로 부하에서 약 250W만을 소모하므로 부하 전류가 약 4.2Arms에서 약 1.25Arms로 줄어든 것을 확인할 수 있다. 그림 9 (b)는 정전 발생 시 방전모드 동작파형을 보이고 있으며 파형은 위에서부터 태양전지 입력 노드 전압, 링크 전압, BDC부 인덕터 전류, 태양전지 전류를 나타낸 것이다. 태양전지 입력 노드 전압은 병렬운전으로 인하여 배터리 전압인 180V로 클램핑 된 것을 확인할 수 있으며, 링크 전압을 BDC부가 일정하게 제어함을 확인할 수 있다. 또한 배터리 전류를 보면 약 1.7A의 평균 전류로 배터리가 충전되고 있음을 확인할 수 있다.

4. 결 론

본 논문에서는 고 전력밀도 및 저가격으로 구성이 가능한 새로운 구조의 PV PCS를 제안하였다. 그림 10 (a)는 기존의 태양광 시스템의 시작점으로 큰 전압 스트레스로 인하여 직·병렬로 구성된 다수 개의 캐패시터를 사용하여 시스템 부피의 큰 비중을 차지 하였다. 또한 MPPT부, BDC부, 인버터부의 3단 구성으로 인하여 시스템 구성을 위한 소자수가 크게 증가하고 이로 인하여 시스템 부피가 매우 커지는 문제점을 가졌다. 따라서 본 논문에서는 이러한 문제를 해결할 수 있는 새로운 구조의 PV PCS 시스템을 제안하였다. 그림 10 (b)는 제안 태양광 시스템으로 배터리를 링크 캐패시터에 직렬로 구성함으로써 링크 캐패시터의 큰 전압 스트레스 문제를 해결하였고, 이를 통하여 적은 수의 캐패시터로 구성이 가능하고, MPPT부와 BDC부를 통합하여 소자를 저감하고 PCB 크기를 크게 줄일 수 있어 고 전력 밀도를 가지는 태양광 시스템 구성이 가능하다. 실험을 통하여 제안 시스템이 기존과 동등한 수



(a) 기존 PV-PCS 시작품



(b) 제안 PV PCS 시작품

그림 10 기존 및 제안 PV PCS 시작품
Fig. 10 Prototypes of conventional and proposed PV PCSs

준의 효율을 나타냄을 확인하였고, 방전모드에서는 태양 전지와 배터리를 병렬 운전함으로써 기존보다 우수한 성능을 나타냄을 입증 하였다. 최종적으로 본 논문에서 제안된 PV PCS를 제품에 적용할 경우 시스템의 저 가격화 및 고 전력밀도 구성이 가능할 것으로 기대 된다.

본 연구는 2011년도 국민대학교 교내 연구비 지원과 지식경제부 및 정보통신산업진흥원의 대학 IT연구센터 지원사업의 연구결과로 수행되었음. (NIPA-2011-C1090-1121-0005)

참 고 문 헌

[1] C.J. Hatziaodniu, F.E. Chalkiadakis, V.K. Feiste, "A Power Conditioner For A Grid-Connected Photovoltaic

Generator Based On The 3-Level Inverter," IEEE Transaction on Energy conversion, vol. 14, pp. 1605-1610, December 1999.

[2] M. Ashari, W.W. L. Keerthipala, C.V. Nayar, "A Single Phase Parallely Connected Uninterruptible Power Supply Demand Side Management System" IEEE Transaction on Energy Conversion, vol. 15, pp. 97-102, March 2000.

[3] H. Him, P. Mutschler, "Voltage Source Inverter for Grid Connected Photovoltaic Systems," 2nd World Conference and Exhibition on Photovoltaic Solar Energy Conversion, Vienna, Australia, July 1998, pp. 2045-2048.

[4] Jinhui Xue, Zhongdong Yin, Bingbing Wu, Ziping Wu, Jun Li, "Technology Research of Novel Energy Storage Control for the PV Generation System" Power and Energy Engineering Conference, 2009, pp. 1-4.

[5] P. Bolduc, D. Lehmicke, J. Smith, "PERFORMANCE OF A GRID-CONNECTED PV SYSTEM WITH ENERGY STORAGE", Photovoltaic Specialists Conference, 1993, pp. 1159-1162.

[6] S.X. hen, H.B. Gooi, "Scheduling of energy storage in a grid-connected PV/battery system via SIMPLORER", TENCON 2009 - 2009 IEEE Region 10 Conference, 2009, pp. 1-5.

[7] S. J. Chiang, K. T. Chang, C. Y. Yen, "Residential Photovoltaic Energy Storage System", IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 45, pp. 385-394, June 1998.

[8] Jiann-Fuh Chen, Luy-Yin Chiang, Ching-Lung Chu, Yong-Lung Lee, Tsorng-Jnu Liang, "study and implementation of the single-phase three-wire photovoltaic energy conversion system", Proceedings of the IEEE 1999 International Conference, 1999, pp. 692-695.

[9] Yu-Kang Lo, Ting-Peng Lee, and Kuan-Hung Wu, "Grid-Connected Photovoltaic Systems With Power Factor Correction", IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 55, pp. 2224-2227, May 2008.

저 자 소 개

금문환(琴文煥)

1981년 11월 9일생. 2008년 국민대 전자정보통신대학 전자공학부 졸업. 2010년 동 대학원 전자공학부 졸업(석사). 2010년~현재 동 대학원 전자공학과 박사과정.





장두희(張斗熙)

1982년 2월 13일생. 2007년 국민대 공과대학 기계자동차공학부 졸업. 2009년 국민대 대학원 전자공학과 졸업(석사). 2009년 3월~현재 국민대 전자공학과 박사과정.



홍성수(洪成洙)

1961년 1월 25일생. 1984년 서울대 전기공학과 졸업. 1986년 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 졸업(석사). 1992년 동대학원 전기 및 전자공학과 졸업(공학박). 1984년~1999년 현대전자(주) 정보통신 연구소 책임연구원. 1999년~현재 국민대 전자정보통신공학부 교수.



한상규(韓翔圭)

1973년 12월 13일생. 1999년 2월 부산대학교 전기공학과 졸업. 2001년 2월 한국과학기술원 전자전산학과 졸업(석사). 2005년 2월 동 대학원 전자전산학과 졸업(공학박). 2005년 3월~2005년 8월 한국과학기술원 정보전자연구소 박사후연구원. 2005년 9월~현재 국민대 전자정보통신공학부 부교수.



사공석진(司空石鎭)

1951년 3월 23일생. 1976년 고려대 전자공학과 졸업. 1981년 동 대학원 전자공학과 졸업(석사). 1985년 동 대학원 전자공학과(공학박). 1977년~1981년 모토롤라 코리아 선임연구원. 1982년~현재 국민대 전자정보통신공학부 교수.